

УДК 621.165+621.438

ВПЛИВ СІТКОВОГО РОЗДІЛЕННЯ НА 3D RANS МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЙ У ПРОТОЧНИХ ЧАСТИНАХ ТУРБОМАШИН

¹ С. В. Єршов,

д-р техн. наук

sergiy.v.yershov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2937-1337

² В. А. Яковлєв,

канд. техн. наук

yava@ipmach.kharkov.ua

ORCID: 0000-0002-6174-3022

¹ Самозайнятий дослідник,
Оулу, Фінляндія² Інститут проблем
машинобудування
ім. А. М. Підгорного
НАН України,
61046, Україна, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10

Розглядається вплив ступеня подрібнення різницевої сітки на результати розрахунку тривимірних течій в'язкого газу в проточних частинах турбомашин при використанні моделей течії RANS і чисельних методів другого порядку. Виконано розрахунки течій для ряду турбінних та компресорних решіток на послідовно подрібнюваних сітках. Використовувалися сітки типу H з наближеною ортогоналізацією комірок в примежовому шарі. Розрахунки проводилися за допомогою CFD розв'язувача F з використанням неявної ENO схеми другого порядку, локального кроку за часом і спрощеного багатосіткового алгоритму. При розрахунку течії на дрібних сітках застосовувалися: засоби прискорення збіжності, реалізовані в розв'язувачі; усічення розрахункової області з подальшим поширенням результатів на основі властивості симетрії; розбиття розрахункової області на частини і розпаралелювання обчислень. Проведено зіставлення отриманих результатів як за якісним розділенням складної структури тривимірних потоків, так і за кількісною оцінкою втрат. Сіткова збіжність оцінювалася двома способами. У першому візуально порівнювалися характерні двовимірні розподіли параметрів, отримані на різних сітках. Метою таких порівнянь було оцінити достатній ступінь розв'язку як загальної структури течії в решітках, так і її особливостей, а саме, стрибків ущільнення, контактних розривів, відривних зон, слідів та ін. Другий спосіб оцінки ґрунтується на індексі сіткової збіжності (GCI). GCI може бути визначений не тільки для інтегральних характеристик течії, таких, як втрати, сили і т. д., але і для тривимірних полів газодинамічних параметрів, зокрема розглядався GCI , розрахований за тривимірним полем щільності. Зроблено висновок, що для наукових досліджень, які вимагають високої точності розрахунків і деталізації структури тривимірної течії, потрібні дуже дрібні різницеві сітки, з кількістю комірок від 10^6 до 10^8 в одному міжлопатковому каналі, в той час як для інженерних розрахунків, при виконанні деяких умов, досить сіток з кількістю комірок менше 1 млн в одному міжлопатковому каналі.

Ключові слова: решітки турбомашин, CFD, 3D RANS моделювання, в'язка стискальна течія, індекс сіткової збіжності, втрати кінетичної енергії.

Вступ

На сьогодні обчислювальна аеродинаміка (CFD) є невід'ємним інструментом дослідження течій в лопаткових апаратах турбін і компресорів та їх проектування. Найбільш поширений на цей час підхід при створенні CFD розв'язувачів – це чисельне моделювання турбулентних течій в'язкого газу з використанням осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS). Вважається, що постановка такої задачі, чисельні методи та алгоритми досить опрацьовані, а відповідні CFD розв'язувачі – протестовані і доведені [1].

Проте якість результатів (їх точність і відтворюваність) у багатьох випадках не завжди є достовірною. Зокрема, результати чисельного моделювання течій в решітках турбін і компресорів продовжують істотно залежати від вибору різницевої сітки. На кількісну і якісну точність розв'язків впливають форма комірок, розмір найближчих до стінок комірок y^+ , кількість комірок в примежовому шарі, величина нерівномірності згущень, ступінь зламів сіткових ліній і т. д.

За останні двадцять років рекомендації щодо вибору сіткового розділення при чисельному моделюванні течій в'язкого газу в міжлопаткових каналах турбомашин з використанням RANS моделей кілька разів зазнали змін: від 100–200 тис. комірок в 90-ті роки минулого століття до 0,5–1,0 млн комірок на цей час [2, 3]. Зазвичай математична або фізична основа таких рекомендацій не з'ясована, вимоги до уточнення сітки часто не є обґрунтованими [3] (можливо, за єдиним винятком для y^+), і в багатьох випадках питання збіжності розв'язків залишається відкритим.

Поширеною практикою є приблизна оцінка сіткової збіжності на основі порівняння таких чи-

Стаття доступна за ліцензією Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© С. В. Єршов, В. А. Яковлєв, 2021

сельних результатів, отриманих із використанням різних сіток:

- деякі загальні характеристики, наприклад ефективність (втрати), сили, масова витрата тощо [4, 5];
- графіки деяких параметрів на твердих поверхнях [5–7];
- контури та чисельні шлірен-візуалізації [8, 9].

У цьому випадку можна зробити таке порівняння, використовуючи необґрунтовані строго кількісні оцінки (наприклад, різниця розв'язків на двох різних сітках менше певного відсотка) або чисто візуально. Автори наведених досліджень також досить успішно практикували всі ці методи протягом тривалого часу.

Останнім часом використання індексу сіткової збіжності (GCI – grid convergence index), запропонованого Роучем [10, 11], стає все більш популярним. Цей підхід полягає у використанні послідовності подрібнених сіток для того, щоб визначити порядок збіжності розв'язків та відносну похибку збіжності для деяких загальних показників потоку. На основі цих даних розраховується індекс сіткової збіжності, який служить універсальним критерієм для порівняння збіжності розв'язків з використанням різних сіток та методів різного порядку апроксимації. В [12] обґрунтовується, що для $GCI \leq 1\%$ розв'язок збігається і параметри потоку в дрібній сітці незначно відрізняються від відповідних значень, розрахованих за допомогою екстраполяції Річардсона. За таких значень індексу сіткової збіжності результати обчислень цілком придатні для досліджень складних газодинамічних явищ. З іншого боку, якщо $GCI \leq 5\%$, то результати обчислень можуть бути використані в інженерних цілях для розуміння загальної фізики потоку або проведення порівняльних досліджень.

Дана робота продовжує попередні дослідження авторів [13] та спрямована на порівняння сіткової збіжності з використанням індексу сіткової збіжності з традиційним наближеним методом оцінки візуально. Особлива увага приділяється аналізу обох математичних критеріїв збіжності (індексу сіткової збіжності та явному порядку чисельного методу), а також якості роздільної здатності ударних хвиль, тангенціальних розривів, відривних зон, кромочних слідів та ін. На основі цього аналізу робляться висновки щодо необхідного доопрацювання сітки.

Модель потоку та чисельні методи

Розглянуто тривимірний стисливий, статистично-усереднений турбулентний в'язкий потік через декілька решіток та ступенів турбомашин. Для опису цього типу потоку використовуємо рівняння RANS та модель турбулентності $k-\omega$ SST [14].

Розрахунки проводилися за допомогою CFD розв'язувача [15, 16] з використанням неявної ENO схеми другого порядку [17, 18] і спрощеного багатосіткового алгоритму. Для прискорення збіжності використано локальний крок за часом.

На початкових етапах розрахунків число Куранта вибиралося в межах від 30 до 50 і тільки при досягненні встановлення знижувалося до 5–10 з метою підвищення точності обчислень. При цьому протягом усього розрахунку для надмірно витягнутих комірок крок за часом дещо зменшувався за спеціальним алгоритмом, запропонованим Фрінком [19].

Математична модель, чисельний підхід, CFD розв'язувач та порівняння з експериментальними даними були детально описані в роботах [15, 20, 21].

Спрощений багатосітковий алгоритм

Спрощений багатосітковий алгоритм (СБА) полягає у використанні для кожного розрахунку набору послідовно вкладених сіток (4 або 5 рівнів вкладеності). Вкладені сітки побудовані таким чином, що збільшення поточного рівня вкладеності на одиницю відповідає зростанню кількості комірок у кожному напрямку строго в два рази. Розрахунок течії починався на найгрубішій з цих послідовно вкладених сіток, і в міру його встановлення результати було інтерпольовано на наступну більш дрібну сітку. Дана процедура повторювалася до повного встановлення розв'язку на самій дрібній сітці.

Розрахункові сітки

Використовувалися сітки типу H з квазіортогональними комітками в примежовому шарі біля суцільних стінок. Сітки було загущено в примежовому шарі біля стінок, а також біля передньої та задньої кромки лопаток, але в основному потоці вони близькі до рівномірних. Сітки, розглянуті в цьому дослідженні, умовно було розділено на п'ять груп залежно від кількості комірок в одному міжлопатковому каналі:

- 1) дуже грубі – менше 10^5 комірок;

- 2) грубі – 10^5 – 10^6 комірок;
- 3) проміжні – 10^6 – 10^7 комірок;
- 4) дрібні – 10^7 – 10^8 комірок;
- 5) дуже дрібні – понад 10^8 комірок.

На етапах подібнення сітки при проведенні серії розрахунків розмірність по кожному сітково-го напрямку збільшувалася приблизно вдвічі. Для сіток всіх груп величина y^+ дотримувалася близькою

до одиниці в радіальному і коловому напрямках. У процесі виконання дослідження було виявлено, що похибки дотримання закону стінки (універсальний профіль швидкості) в чисельному розв'язку неприпустимо зростають, якщо поперек примежового шару розташовано менш 30 комірок і відношення кроків сітки в коловому напрямку в цій області виявляється більше ніж 1,1. Тому при проведенні розрахунків на сітках 3, 4 і 5-ї груп ці вимоги строго виконувалися. Забезпечення цих вимог на сітках 1-ї та 2-ї груп без зниження точності в ядрі потоку дуже проблематично, тому при виборі згущення для таких сіток приймалися компромісні рішення. На рис. 1 наведено приклад сіток, розглянутих в цьому дослідженні (показано тільки кожен четверту лінію сітки в кожному напрямку).

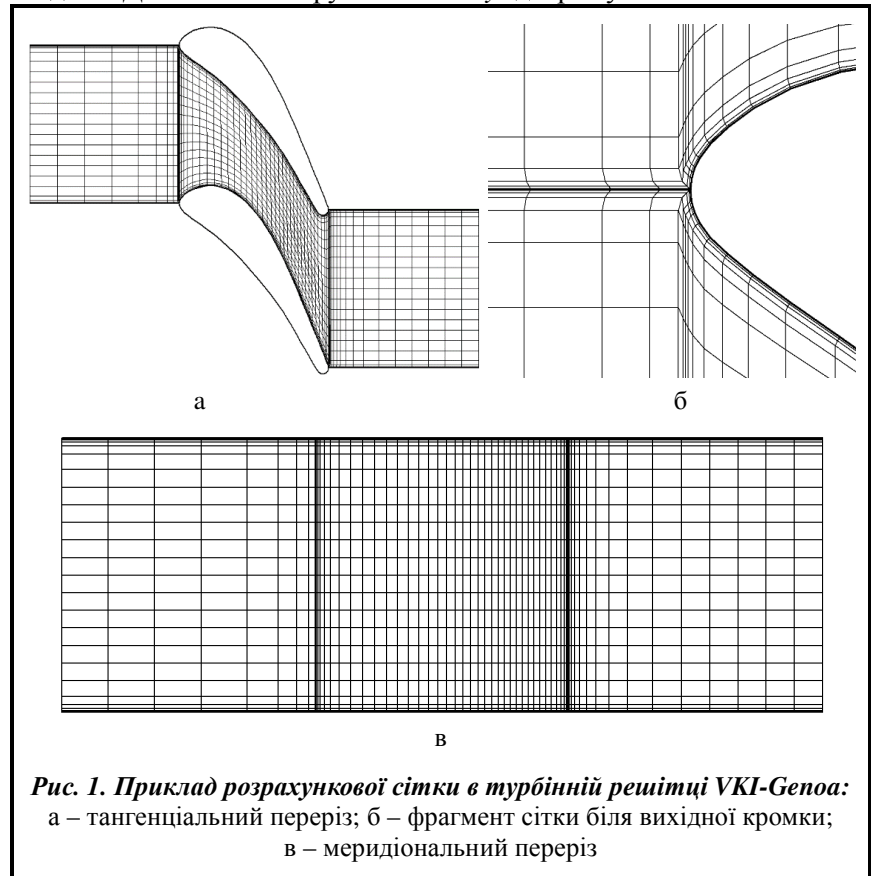


Рис. 1. Приклад розрахункової сітки в турбінній решітці VKI-Genoa:
а – тангенціальний переріз; б – фрагмент сітки біля вихідної кромки;
в – меридіональний переріз

Збіжність за часом

Головним критерієм встановлення вважалася сталість за часом (з заданою точністю) значення коефіцієнта втрат кінетичної енергії. Крім того, на вході і виході кожного ряду лопаток контролювалося зближення як потоку масової витрати, так і потоків турбулентної кінетичної енергії.

Важливо також зазначити, що дефекти збіжності розрахунків, утворені під час обчислень на більш грубих сітках з використанням СБА, повільно усуваються на більш дрібних сітках, особливо в невеликих та сильно витягнутих комітках, які, як правило, розташовані в примежових шарах і вздовж вихідної кромки. Така поведінка може створити ілюзію часової збіжності розв'язку. Тому під час обчислень із використанням СБА надзвичайно важливо забезпечити збіжність розв'язку за часом на всіх рівнях вкладених сіток.

Техніка дослідження сіткової збіжності

Основна мета даної роботи – дослідити сіткову збіжність чисельного розв'язку, не прив'язуючись до експериментальних даних. Очевидно, що як недостатня адекватність математичної моделі, так і чисельні та експериментальні помилки можуть призвести до того, що в деяких випадках різниця між числовими результатами та експериментальними даними може зростати в міру вдосконалення сітки.

Сіткова збіжність оцінювалася двома способами. У першому з них візуально порівнювалися характерні двовимірні розподіли параметрів, що отримані на різних сітках. Метою таких порівнянь було оцінити достатній ступінь розв'язання як загальної структури течії в решітках, так і його особливостей, а саме, стрибків ущільнення, тангенціальних розривів, слідів, відривів і т. д.

Другий спосіб оцінки сіткової збіжності ґрунтується на індексі сіткової збіжності [10, 11]. Відповідно до рекомендацій з розрахунку GCI [22] може бути використана така процедура оцінки похибки, пов'язана з недостатньою сітковою збіжністю:

- а) розглядаються три послідовно подрібнених сітки, обраним сіткам зіставляються індекси: $j=1$ для найбільш дрібної сітки, $j=2$ для проміжної сітки і $j=3$ для найбільш грубої сітки;
 б) для кожної обраної сітки розраховується середній крок

$$h_j = \left(\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta V_{i,j} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

де n_j – кількість комірок сітки j ; $\Delta V_{i,j}$ – об'єм i -ї комірки сітки j .

Згідно з пунктом а повинна виконуватися нерівність $h_1 < h_2 < h_3$;

в) розраховується коефіцієнт подрібнення сітки

$$r_{21} = h_2/h_1; \quad r_{32} = h_3/h_2; \quad (2)$$

г) для кожної з сіток вибирається або розраховується змінна величина φ_j , за якою буде оцінюватися збіжність;

д) визначаються абсолютні похибки

$$\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1; \quad \varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2; \quad (3)$$

е) методом простої ітерації розраховується «спостережуваний» порядок різницевого методу

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p) \right|; \quad (4)$$

де $q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right)$; $s = \text{sgn}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21})$;

ж) розраховується екстрапольоване за Річардсоном значення змінної, за якою оцінюється сіткова збіжність

$$\varphi_{ext} = \frac{r_{21}^p \varphi_1 - \varphi_2}{r_{21}^p - 1}; \quad (5)$$

з) визначається відносна похибка розрахунку на самій дрібній сітці відносно до розрахунку на проміжній сітці

$$e_{21} = \left| \frac{\varepsilon_{21}}{\varphi_1} \right|; \quad (6)$$

и) розраховується GCI

$$GCI_{21} = \frac{5}{4} \frac{e_{21}}{r_{21}^p - 1}. \quad (7)$$

За даною процедурою можна зробити такі зауваження.

Оскільки сума у формулі (1) являє собою сумарний об'єм розрахункової сітки, який при до- сить дрібних сітках змінюється незначно, то можна вважати, що коефіцієнт сіткового згущення r до- рівнює відношенню кількості комірок порівнюваних сіток

$$r_{jk} = n_k/n_j. \quad (8)$$

Величина коефіцієнта сіткового згущення r згідно з дослідженнями [22] повинна бути більше 1,3.

У рівнянні (4), яке визначає сіткову збіжність, містяться дві функції абсолютного значення. Одна з них має абсолютний коефіцієнт помилок як аргумент, а інша фактично встановлює позитивний порядок збіжності, якщо коефіцієнт уточнення сітки r більше 1. Останнє не впливає з виведення цієї формули і може мати таку важливу особливість, як розбіжність розв'язку, коли похибки при под- рібненні сітки зростають і «спостережуваний» порядок сіткової збіжності стає негативним.

Така поведінка може спостерігатися не тільки за некоректної постановки задачі, а зокрема, при чисельному насиченні розв'язку на надзвичайно дрібних сітках. У даній роботі порядок збіжності сітки визначається таким чином:

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} [\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)]. \quad (9)$$

Досить очевидно, що порівнювані сітки повинні бути максимально «подібні». Наприклад, не рекомендується розраховувати індекс сіткової збіжності, якщо розв'язки отримані на сітках різних типів Н, С або О. В ідеальному випадку комірки різних сіток, однаково розташовані в розрахунковій області, повинні бути геометрично подібними. Це дозволяє виключити з розгляду додаткові сіткові похибки, пов'язані з різною структурою сіток.

Дана процедура добре працює в діапазоні асимптотичної збіжності розв'язків. При виході за його межі порядок збіжності може сильно відрізнятись від дійсного порядку різницевої схеми. Це може відбуватися як для грубих сіток, на яких невірно відтворюється геометрія об'єктів, так і на дрібних сітках, коли досягається чисельне насичення і накопичуються похибки округлення.

У даній роботі GCI розраховувався для повної сили f_j , що діє на лопатки, і для коефіцієнта втрат кінетичної енергії ζ_j в решітці (або ступені), визначеного як

$$\zeta_j = \left[\frac{I_{exit} - I_{exit}^{is}}{I_{inlet}^{tot} - I_{exit}^{is}} \right]_j, \quad (10)$$

де I – ентальпія; верхні індекси tot і is – повні та ізоентропічні параметри, нижні індекси $inlet$ і $exit$ – параметри на вході і виході розрахункової області.

Ізоентропічна ентальпія, згідно з ідеєю Дентона [23], знаходиться зі зростанням ентропії в проточній частині

$$I_{exit}^{is} = I_{exit} \left(\frac{S_{inlet}}{S_{exit}} \right)^{1/\gamma}, \quad (11)$$

де $S = p/\rho^\gamma$ – ентропійна функція; p – тиск; ρ – щільність.

Ентальпія і ентропія в формулах (10), (11) осереднені в коловому і радіальному напрямках.

Індекс сіткової збіжності може бути визначений не тільки для інтегральних характеристик течії, таких, як втрати, сили тощо., але і для тривимірних полів газодинамічних параметрів. В останньому випадку замість величини φ_1 в рівнянні (6) і абсолютних похибок ε в рівнянні (3) для всього тривимірного поля течії розраховуються l_1 норми обраного параметра течії і його абсолютної похибки на різних сітках. У даній роботі розглядається індекс сіткової збіжності, розрахований за тривимірним полем щільності.

Зазвичай відносні похибки та індекс сіткової збіжності записуються у відсотках.

Течія в дозвуковій решітці VKI-Genoa

Розглянуто дозвукову течію в турбінній решітці VKI-Genoa, яка була експериментально досліджена [24, 25]. Розрахунки для режиму течії з адіабатичним числом Маха на виході $M_{1is}=0,24$ проводилися на сітках 8 тис., 65 тис., 520 тис. та 4,2 млн комірок.

На рис. 2 наведені ізолінії числа Маха в середньому перерізі міжлопаткового каналу для сіток 520 тис. (рис. 2, а) і 4,2 млн (рис. 2, б) комірок. Видно, що розв'язки для дозвукової течії досить близькі.

В табл. 1 показано дослідження сіткової збіжності для решітки VKI-Genoa. У цьому та інших випадках досліджується сіткова збіжність втрат кінетичної енергії, загальної сили, що діє на лопатку і тривимірне поле щільності в лопаткових каналах. Індекси ζ , f і ρ відповідають параметрам сіткової збіжності, які вираховані для похибок втрат кінетичної енергії, повної сили і тривимірного поля щільності відповідно.

Тут і далі індекс сіткової збіжності для деякої сітки розраховується з використанням результатів розрахунків на даній сітці (j) і двох більш грубих сітках ($j-1$ і $j-2$).

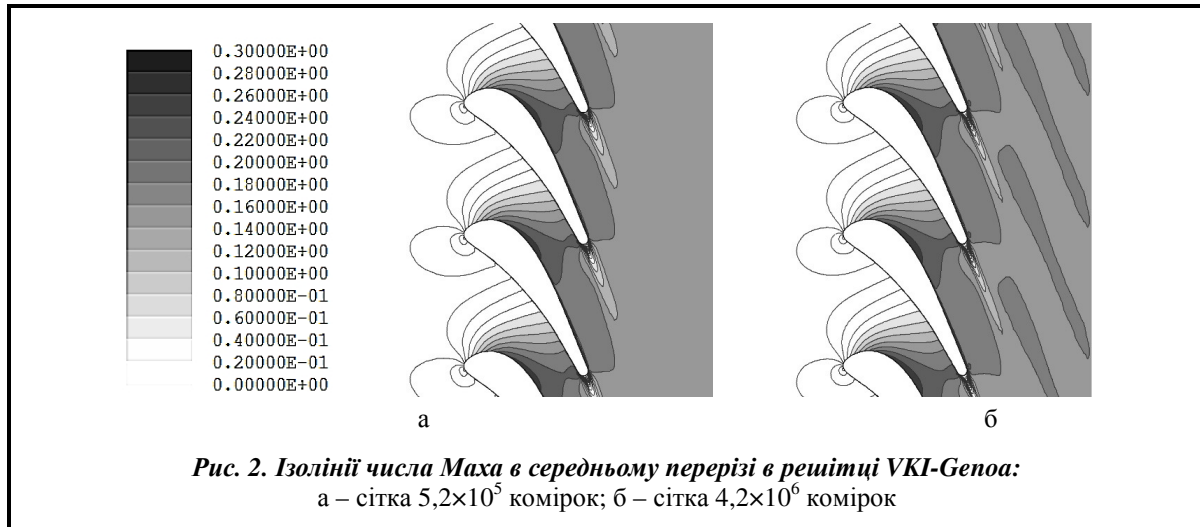


Рис. 2. Ізолнії числа Маха в середньому перерізі в решітці VKI-Genoa: а – сітка $5,2 \times 10^5$ комірок; б – сітка $4,2 \times 10^6$ комірок

Таблиця 1. Сіткова збіжність для решітки VKI-Genoa

Кількість комірок	Група сіток	ζ	ζ_{ext}	p_ζ	$e_{21,\zeta}$	GCI_ζ	$f [N]$	$f_{ext} [N]$	p_f	$e_{21,f}$	GCI_f	p_D	GCI_D
$8,2 \cdot 10^3$	1	0,317	–	–	–	–	162,1	–	–	–	–	–	–
$6,5 \cdot 10^4$		0,188	–	–	–	–	168,0	–	–	–	–	–	–
$5,2 \cdot 10^5$	2	0,127	0,072	1,08	48,00	53,90	170,0	171,1	1,55	1,19	0,78	2,04	0,07
$4,2 \cdot 10^6$	3	0,123	0,123	4,00	3,08	0,26	171,0	171,8	1,09	0,56	0,62	1,26	0,84

Аналіз чисельних результатів показує, що різні параметри мають різну швидкість сіткової збіжності. Порядок збіжності розв’язку p варіюється від 1 до 2, беручи до уваги випадки «суперзбіжності» за втратами кінетичної енергії на самій дрібній сітці 3-ї групи. Також слід зазначити надмірно великі втрати на найгрубшій сітці 1-ї групи. Ці дві аномалії, що не спостерігаються при збіжності за іншими розглянутими параметрами, дозволяють припустити, що діапазон асимптотичної збіжності для втрат кінетичної енергії дещо вужче, ніж для інших параметрів, і, в даному випадку, сітки 1 і 3-ї групи виявляються поза ним. Проте для даної решітки сітка 3-ї групи з 4,2 млн комірок характеризується індексом сіткової збіжності, меншим одиниці для всіх розглянутих параметрів. Ця сітка виявляється достатньою для моделювання течії в даній решітці і тому була обрана для подальшого вивчення повністю турбулентної та перехідної течії [20, 21].

Трансзвукова течія в ступені турбіни ABB-Saturn

Розглянуто трансзвукову течію в турбінному ступені фірми ABB-Saturn [26]. У цьому випадку обидва каскади є кільцевими, потік через них трансзвуковий, а умови вихідного потоку $M_{1is}=0,87$ для решітки статора і $M_{w2is}=0,71$ для решітки ротора. Розрахунки проводилися на сітках 4 тис., 30 тис., 240 тис., 1,9 млн і 15,3 млн комірок для міжлопаткових каналів решіток статора і ротора.

На рис. 3, 4 наведено результати розрахунку течії в середньому перерізі направляючої і робочої решіток відповідно з використанням сіток 2–4-ї груп. Чисельну шлірен-візуалізацію наведено для різних сіток, а ізолнії числа Маха – тільки для найбільш дрібної з розглянутих сіток.

З рисунків видно, що на сітках 2-ї групи (рис. 3, а, 4, а) стрибки ущільнення слабо помітні і їх положення визначено неточно. На сітці 3-ї групи (рис. 3, б, 4, б) стрибки виділені краще, а на сітці 4-ї групи (рис. 3, в і рис. 4, в) отримана чітка структура стрибків ущільнення. Ця сітка дозволяє виявити в робочій решітці невеликий відрив, що трохи міняє конфігурацію стрибка. Аналогічні висновки можна зробити також щодо сліду.

Слід зауважити, що при чисельній шлірен-візуалізації на рисунках видно обчислювальні артефакти у вигляді горизонтальних і вертикальних ліній поблизу вхідних і вихідних кромки. Дані явища спостерігаються в областях істотної зміни кроків і форми комірок і підтверджують втрату точності, що виявляється у великій похибці визначення похідних параметрів течії.

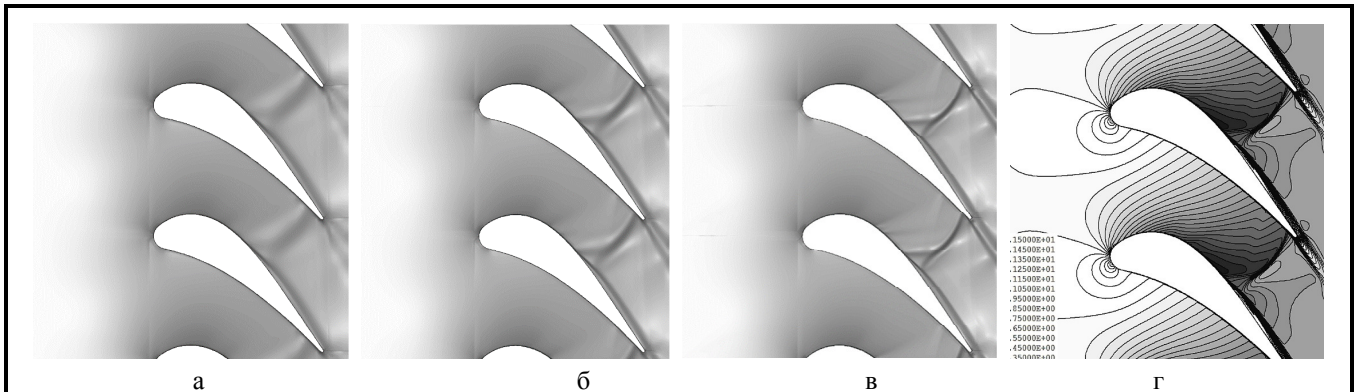


Рис. 3. Течія в середньому перерізі напрямної решітки турбінного ступеня ABB-Saturn
 а, б, в – чисельна шлірен-візуалізація ($2,4 \times 10^5$; $1,9 \times 10^6$ і $1,5 \times 10^7$ комірок);
 г – ізолінії числа Маха ($1,5 \times 10^7$ комірок)

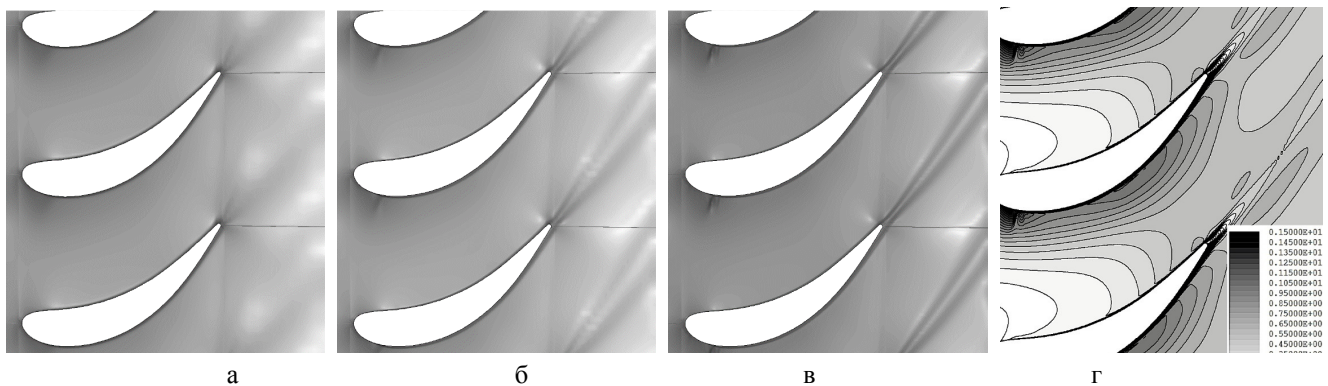
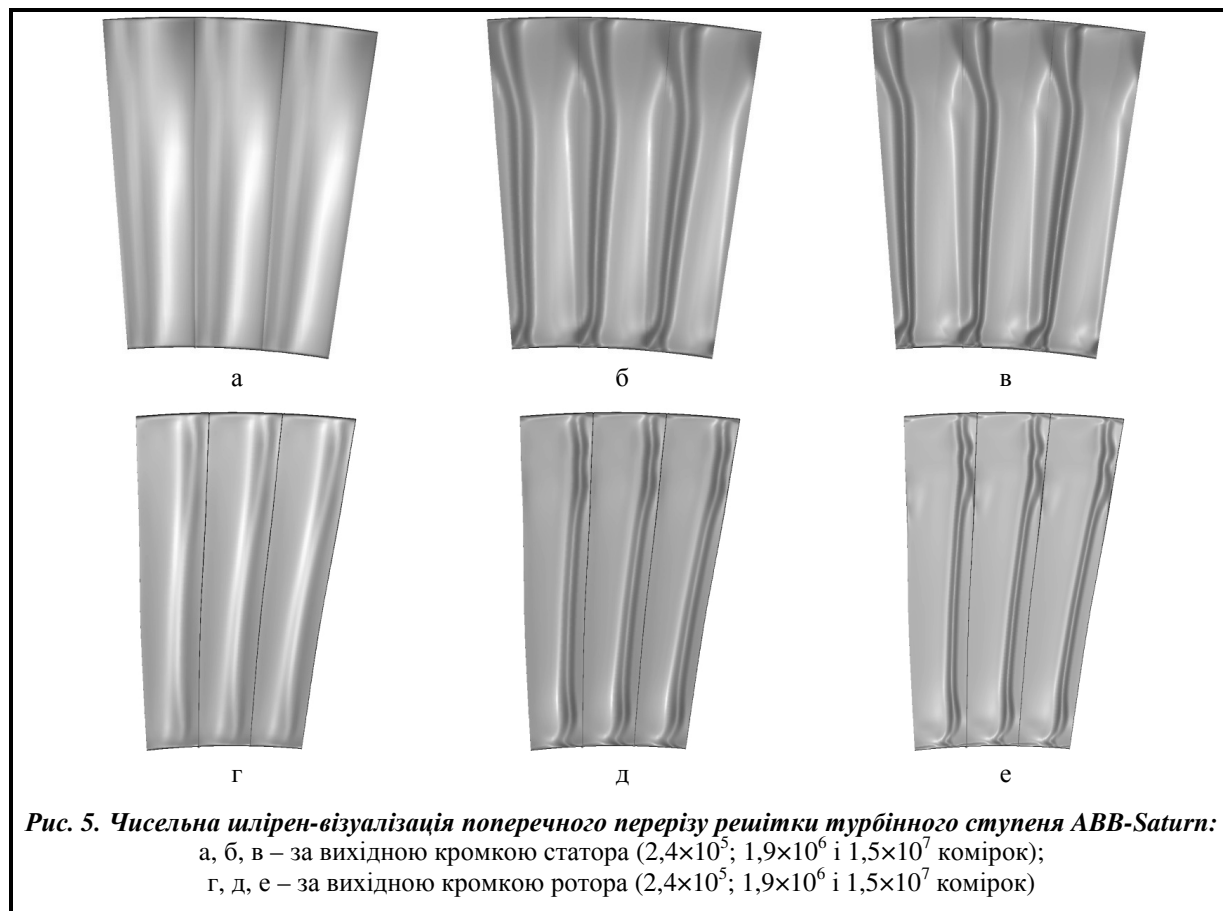


Рис. 4. Течія в середньому перерізі робочої решітки турбінного ступеня ABB-Saturn:
 а, б, в – чисельна шлірен-візуалізація ($2,4 \times 10^5$; $1,9 \times 10^6$ і $1,5 \times 10^7$ комірок);
 г – ізолінії числа Маха ($1,5 \times 10^7$ комірок)

Рис. 5 демонструє чисельну шлірен-візуалізацію потоку на поперечних ділянках статора (рис. 5, а, б, в) та ротора (рис. 5, г, д, е) на відстані близько 10% осьової хорди лопатки у випадках обчислень із використанням сіток 2-ї групи (рис. 5, а, г), 3-ї групи (рис. 5, б, д) та 4-ї групи (рис. 5, в, е). На кожному зображенні показано три лопаткових канали кільцевої решітки. Видно, що у випадку з сітками 2-ї групи сліди за вихідними кромками є нечіткими, особливо нижче за течією решітки статора, а вторинні потоки в зонах торцевої стінки майже нерозрізнені. Роздільна здатність слідів та вторинних потоків значно покращується у випадку сіток 3-ї групи і є найбільш чіткою у випадку сіток 4-ї групи.

У табл. 2 показано дослідження сіткової збіжності у разі розрахунків потоку в ступені турбіни. Як ключові змінні ми розглядали втрати кінетичної енергії ступеня турбіни, загальну силу, що діє на лопатки ротора, та 3D поле щільності в ступені турбіни. Існує тенденція до збіжності розв'язків при подрібненні сітки. Порядок збіжності сітки різних параметрів на різних сітках коливається від 0,9 до 1,5, за винятком випадку повної сили, що діє на лопатки ротора для сітки 2-ї групи. В останньому випадку існує розбіжність розв'язку (негативний видимий порядок збіжності) на грубих сітках. У випадку дрібної сітки 4-ї групи, яка містить близько 30 мільйонів комірок у лопатковому каналі турбіни, індекс сіткової збіжності як для сумарної сили, так і для 3D поля щільності становить менше 1. Водночас значення індексу сіткової збіжності та відносної похибки, обчислені з використанням втрат кінетичної енергії на цій сітці, є досить великими і становлять близько 8 та 5 відсотків відповідно. Цей факт узгоджується із згаданими вище різницями в полях газодинамічних параметрів на сітках 3 і 4-ї груп і показує, що сітки в 15 млн комірок на лопатковий канал можуть бути недостатніми для гарантованої сіткової збіжності у випадку розрахунку потоку в ступені турбіни. Проте такий ступінь збіжності може бути цілком достатнім для інженерних розрахунків.


Таблиця 2. Сіткова збіжність для турбінного ступеня ABB-Saturn

Кількість комірок	Група сіток	ζ	ζ_{ext}	p_ζ	$e_{21,\zeta}$	GCI_ζ	$f [N]$	$f_{\text{ext}} [N]$	p_f	$e_{21,f}$	GCI_f	p_p	GCI_p
$2 \times 3,8 \cdot 10^3$	1	0,177	–	–	–	–	205,2	–	–	–	–	–	–
$2 \times 3,0 \cdot 10^4$		0,129	–	–	–	–	214,0	–	–	–	–	–	–
$2 \times 2,4 \cdot 10^5$	2	0,112	0,103	1,50	15,20	10,40	226,1	259,3	-0,45	5,33	-25,0	0,225	16,10
$2 \times 1,9 \cdot 10^6$	3	0,103	0,093	0,92	8,74	12,30	230,9	234,0	1,33	2,07	1,71	0,925	1,61
$2 \times 1,5 \cdot 10^7$	4	0,098	0,092	0,85	5,10	7,97	232,5	233,4	1,52	0,72	0,48	1,148	0,54

Надзвукова течія в компресорній решітці проекту TFAST програми FP7

Розглянуто надзвукову течію у компресорній решітці, розрахунково-експериментальне дослідження якої було здійснено в проекті TFAST програми FP7 [27]. За умовами експерименту на торцевих поверхнях здійснювався відбір примежового шару для зменшення вторинних течій і відривів. Розрахунки проводилися для режиму $\pi_k=1,22$ з відносним числом Маха на вході $M_{1w}=1,2$ на сітках 2,4; 9,2; 54 і 250 млн комірок, перші три з яких за розмірністю тангенціальних сіткових поверхонь відповідають двовимірним сіткам роботи [28]. У цьому випадку коефіцієнт уточнення сітки r змінювався для різних сіток від 1,46 до 1,8.

На рис. 6 показана чисельна шлірен-візуалізація течії в середньому перерізі міжлопаткового каналу для різних сіток. Видно, що на сітках 3-ї групи (рис. 6, а; 6, б) усі стрибки «розмазані», а від'єднана ударна хвиля, косі стрибки на вхідній кромці і структура стрибків за вихідною кромкою погано розділені. На сітці 4-ї групи (рис. 6, в) поліпшено розділення головних стрибків ущільнення, однак відбиття від поверхні лопатки косоного стрибка, що сходив з вхідної кромки, і «нерозмазана» структура стрибків за вихідною кромкою чітко видно тільки на розв'язку, отриманому на сітці 5-ї групи (рис. 6, г). Розділення відривів, слідів і особливо тангенціальних розривів за троїстими точками стрибків ущільнення також істотно поліпшується з подібненням сітки і для сітки 5-ї групи є найкращим.

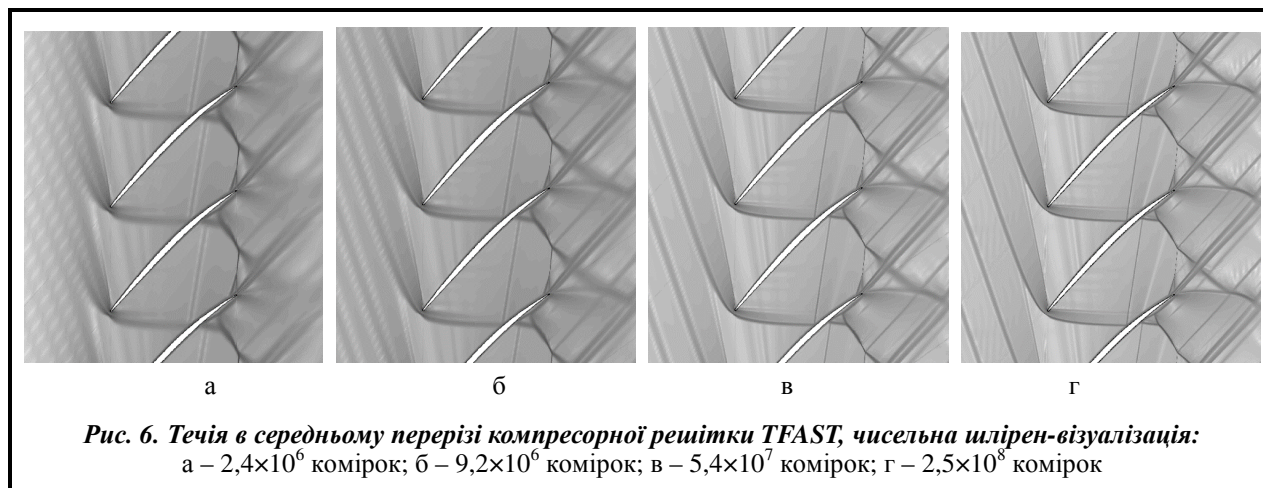


Рис. 6. Течія в середньому перерізі компресорної решітки TFAST, чисельна шлірен-візуалізація:
а – $2,4 \times 10^6$ комірок; б – $9,2 \times 10^6$ комірок; в – $5,4 \times 10^7$ комірок; г – $2,5 \times 10^8$ комірок

У табл. 3 показано дослідження сіткової збіжності при розрахунках потоку в решітці компресора. Порядок сіткової збіжності на сітці 3-ї групи коливається від 1,1 до 1,9. Сітки 4 та 5-ї групи (табл. 3), мабуть, лежать поза асимптотичним діапазоном за втратами кінетичної енергії, оскільки спостерігається «суперзбіжність». Завдяки цьому на дрібній сітці можна спостерігати збіжність обчислених втрат кінетичної енергії до їх екстрапольованого значення. Індекси сіткової збіжності (GCI) у випадках сітки 4 та 5-ї груп складають менше 1%. На самій дрібній сітці 5-ї групи порядок збіжності повної сили негативний, що свідчить про чисельне насичення розв'язку і, мабуть, пояснюється виходом з діапазону асимптотичної збіжності.

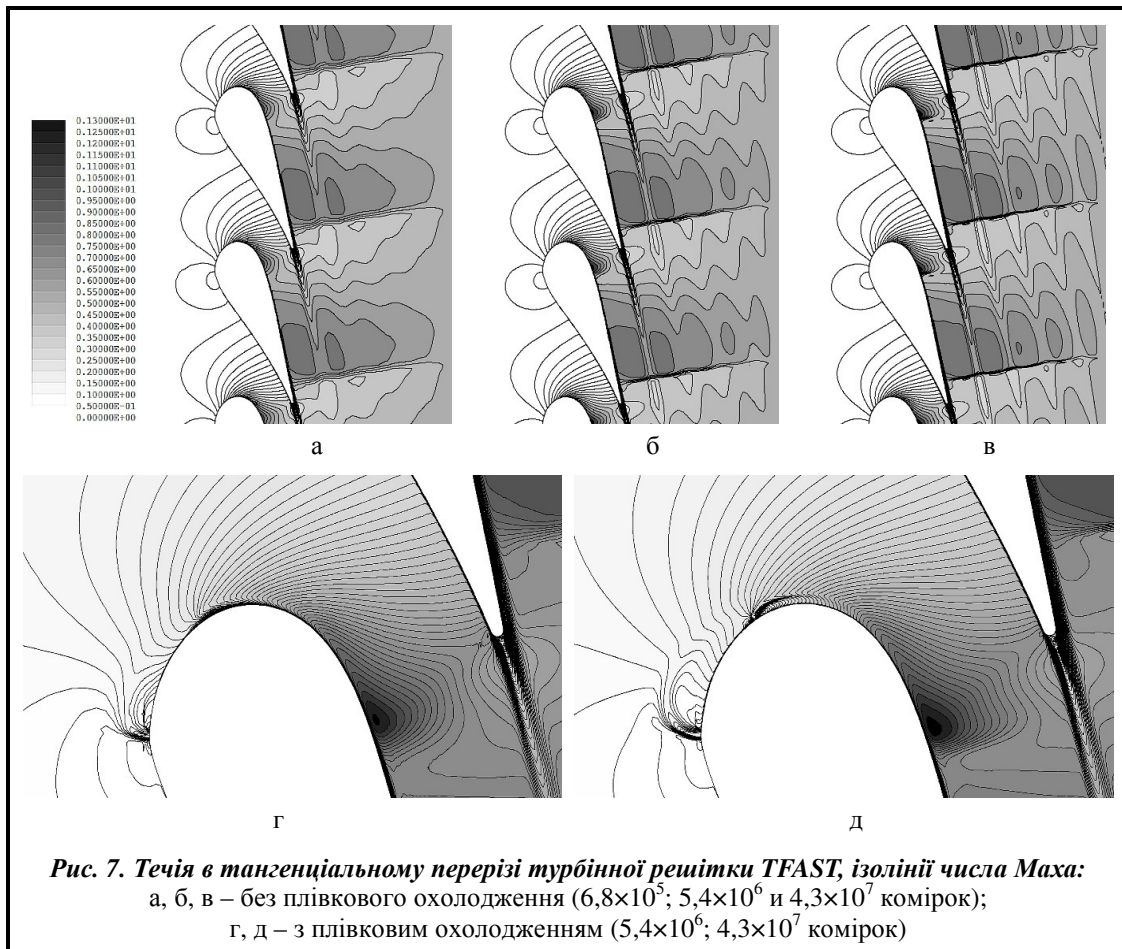
Таблиця 3. Сіткова збіжність для компресорної решітки TFAST на режимі $\pi_k=1,22$

Кількість комірок	Група сіток	ζ	ζ_{ext}	$p\zeta$	$e_{21,\zeta}$	GCI_ζ	$f [N]$	$f_{ext} [N]$	p_f	$e_{21,f}$	GCI_f	p_p	GCI_p
$7,7 \cdot 10^5$	2	0,1727	–	–	–	–	260,2	–	–	–	–	–	–
$2,4 \cdot 10^6$	3	0,1496	–	–	–	–	266,9	–	–	–	–	–	–
$9,2 \cdot 10^6$		0,1373	0,1284	1,94	8,96	8,07	269,7	271,7	1,94	1,00	0,94	1,056	7,371
$5,4 \cdot 10^7$	4	0,1342	0,1337	3,31	2,31	0,48	271,5	273,2	1,30	0,68	0,77	0,923	0,416
$2,5 \cdot 10^8$	5	0,1340	0,1340	4,59	0,15	0,02	273,3	290,5	-0,18	0,67	-9,68	0,440	0,763

Трансзвукова течія в турбінній решітці проекту TFAST програми FP7

Було розглянуто трансзвукову течію в турбінній решітці, розрахунково-експериментальне дослідження якої проведено в проекті TFAST програми FP7 [27]. Розрахунки виконувалися для режимів обтікання при $M_{is}=1,05$ з плівковим охолодженням і без нього на сітках 11 тис., 85 тис., 680 тис., 5,4 млн і 43,5 млн комірок. Плівкове охолодження здійснювалося видуванням повітря через два ряди рівномірно розташованих в ядрі потоку отворів (в кожному ряду 46 отворів), кожний площею близько $0,5 \text{ мм}^2$ з довжиною лопатки 125 мм і її хордою 76 мм. Ми не розглядали потік в решітці з плівковим охолодженням із використанням сіток 1-ї групи, оскільки в цьому випадку площа поверхні стінки для пристінних комірок була набагато більшою, ніж площа отвору для охолодження. У випадку з сітками 3 та 4-ї груп ми використовували від 1 до 4 комірок на один отвір та від 6 до 16 комірок на один отвір відповідно.

На рис. 7 показано ізолінії числа Маха в середньому перерізі міжлопаткового каналу для різних сіток без плівкового охолодження і з ним (фрагмент поблизу вхідної кромки). Наведені рисунки дозволяють зробити висновок, що розділення стрибків і сліду істотно поліпшується при подрібненні сітки. Так, розв'язок на сітках 2-ї групи (рис. 7, а) характеризується дуже розмазаним слідом і стрибком ущільнення на стороні розрідження відразу за горлом решітки. На сітці 3-ї групи (рис. 7, б) розв'язок дещо кращий, а на сітці 4-ї групи (рис. 7, в) спостерігається найбільш чітке розрізнення стрибка, який можна однозначно інтерпретувати як розрив, та сліду. Струмені охолоджуючого газу також краще розраховуються на більш дрібних сітках. Розрахунок з використанням сіток 1 і 2-ї груп не проводився, оскільки в цьому випадку розміри бічних поверхонь пристінкових комірок перевищували розміри отворів. З рис. 7 видно, що для сітки 3-ї групи (рис. 7, г) струмені холодного повітря притискаються до поверхні розрідження лопатки, тоді як для сітки 4-ї групи (рис. 7, д) вони проникають значно далі в основний потік.



У табл. 4 показано дослідження сіткової збіжності розв’язку без урахування охолодження плівки. Існує тенденція збіжності розв’язку, тоді як сітка подрібнюється. Порядок збіжності варіюється від 0,3 до 2,1 для різних параметрів і сіток. Індекс сіткової збіжності для сіток 4-ї групи менше 1 для всіх розглянутих параметрів, а для сітки 3-ї групи тільки для втрат кінетичної енергії – більше 1.

Таблиця 4. Сіткова збіжність для турбінного ступеня TFAST без плівкового охолодження

Кількість комірок	Група сіток	ζ	ζ_{ext}	p_c	$e_{21,c}$	GCI_c	$f [N]$	$f_{ext} [N]$	p_f	$e_{21,f}$	GCI_f	p_D	GCI_D
$1,1 \cdot 10^4$	1	0,0916	–	–	–	–	491,4	–	–	–	–	–	–
$8,5 \cdot 10^4$		0,0653	–	–	–	–	492,6	–	–	–	–	–	–
$6,8 \cdot 10^5$	2	0,0575	0,0542	1,75	13,60	7,15	492,4	492,4	2,75	0,04	0,01	0,998	1,29
$5,4 \cdot 10^6$	3	0,0524	0,0428	0,61	9,73	22,90	492,2	493,2	0,39	0,05	0,20	1,123	0,50
$4,3 \cdot 10^7$	4	0,0512	0,0508	2,09	2,34	0,90	492,0	491,0	0,28	0,04	0,24	0,590	0,31

Результати аналогічного дослідження збіжності для течії в даній турбінній решітці з плівковим охолодженням наведені в табл. 5. Порядок збіжності варіюється від 0,9 до 1,4, а індекс сіткової збіжності на сітці 4-ї групи для всіх параметрів менше 1%, крім втрат кінетичної енергії, для яких він трохи менше 2%. Незважаючи на невисокі значення індексу сіткової збіжності і відносної похибки, не можна стверджувати, що в даному випадку розв’язок збігся. Це підтверджують і раніше наведені порівняння на рис. 7 г, д, де видно, що розв’язок продовжує змінюватися і на дрібних сітках: струмені охолоджуючого газу істотно глибше проникають в потік при подрібненні сітки. Зростання втрат кінетичної енергії на сітці 4-ї групи якраз цим і пояснюється, оскільки струмені сильніше збурюють і прилеглий шар, і ядро потоку. Мабуть, вплив струменів охолоджуючого газу на втрати в решітці має той же порядок, що і похибка двократного подрібнення сітки, і тому величина індексу сіткової збіжності не відображає реальної ситуації збіжності.

Таблиця 5. Сіткова збіжність для турбінного ступеня TFAST з плівковим охолодженням

Кількість комірок	Група сіток	ζ	ζ_{ext}	p_ζ	$e_{21,\zeta}$	GCI_ζ	$f [N]$	$f_{ext} [N]$	p_f	$e_{21,f}$	GCI_f	p_D	GCI_D
$6,8 \cdot 10^5$	2	0,0589	–	–	–	–	492,6	–	–	–	–	–	–
$5,4 \cdot 10^6$	3	0,0567	–	–	–	–	491,9	–	–	–	–	–	–
$4,3 \cdot 10^7$	4	0,0577	0,0585	1,14	1,73	1,81	491,7	491,5	1,44	0,05	0,04	0,904	0,40

Обчислювальний час

У табл. 6 наведено обчислювальний час усіх розглянутих проточних частин та деякі додаткові дані. Дані за часом однієї ітерації і кількості ітерацій наведено для самої дрібної сітки (найбільший рівень сітки). Кількість ітерацій і час розрахунку в таблиці округлені.

Таблиця 6. Обчислювальний час

Решітка /ступінь	Кількість комірок	Розбиття	Кількість рівнів сітки	Пам'ять, Гб	Час однієї ітерації, с	Кількість ітерацій	Час розрахунку, днів
VKI-Genoa	$4,19 \cdot 10^6$	128×128×256	4	0,75	15	60000	12
ABB-Saturn	$3,07 \cdot 10^7$	2×194×208×384	5	2×2,8=5,6	59	80000	60
TFAST turbine	$4,35 \cdot 10^7$	368×224×528	5	9,5	157	100000	195
TFAST compressor	$2,48 \cdot 10^8$	496×496×1008	5	3×16,4=49,2	121	200000	370

Нижче наведено деякі коментарі щодо особливих умов обчислювальних експериментів.

Розпаралелювання розрахунку ABB-Saturn здійснювалося на два потоки стандартними засобами нашого розв'язувача (один потік – один міжлопатковий канал одного вінця). Навпаки, при розрахунку потоку в компресорній решітці TFAST (де лопатки постійного перерізу і плоскі торцеві поверхні) обчислення проводилися в усеченій розрахунковій області, що охоплює тільки половину висоти лопатки, а на границі задавалися умови симетрії. При розпаралелюванні розрахунку у цьому випадку обчислювальна область була розділена в осьовому напрямку на три блоки. Оскільки зв'язок між блоками забирав багато часу, обмін даними здійснювався один раз за вказану кількість кроків часу. Похідні ENO та в'язкі члени також були «заморожені» протягом декількох часових кроків для прискорення розрахунків. Такі можливості поки не реалізовані в коді стандартної версії розв'язувача F, але будуть включені в майбутньому.

Розрахунки потоків в турбомашиних виконані з використанням працюючих в ОС Windows 7 таких комп'ютерів:

- Intel Core i7-4820, 3.7 ГГц, RAM 64 Гб (сітки 4 і 5-ї груп);
- Intel Core i7-3770, 3.5 ГГц, RAM 32 Гб 16 Гб (сітки 1–4-ї груп).

Висновки

Проведені дослідження підтверджують відомий факт, що масштаби сітки повинні відповідати масштабам розрахованої течії, тобто характерним розмірам областей потоку з істотними градієнтами термодинамічних, кінематичних і турбулентних параметрів течії. Це потребує наявності достатньо дрібних сіток, щонайменше, порядку 10^7 комірок на один міжлопатковий канал, при використанні різницевого методу другого порядку в разі розрахунків RANS. Такі ж сітки необхідні для хорошого розділення стрибків ущільнення, відривів, слідів, тангенціальних розривів. Додаткові вимоги подрібнення сітки можуть бути викликані різними особливостями геометрії проточної частини і течії, як, наприклад, плівкове охолодження, генератори вихорів та ін.

Дослідження сіткової збіжності з використанням GCI дозволило зробити такі висновки. Втрати кінетичної енергії при подрібненні сітки, так само як при встановленні, показали найбільш повільну збіжність в порівнянні з іншими показниками – повною силою і тривимірним полем щільності. Крім того, виявлено, що у втрат кінетичної енергії більш вузький діапазон асимптотичної збіжності, ніж у інших розглянутих параметрів (коефіцієнт подрібнення сітки повинен бути порядком від 1,3 до 1,5).

Індекс сіткової збіжності, розрахований за втратами кінетичної енергії, може зростати при подрібненні сітки, якщо для його обчислення використовуються грубі сітки 1-ї групи. Це пов'язано з тим, що оцінка втрат кінетичної енергії за допомогою дуже грубих сіток може бути недостатньою. Така поведінка спостерігалася для ступеня турбіни ABB-Saturn (табл. 2) і для турбінної решітки

TFAST (табл. 4) на сітках 3-ї групи, що підтверджує вузький діапазон асимптотичної збіжності для втрат кінетичної енергії.

Якщо використовуються дуже дрібні сітки та спостерігається «числове насичення», тоді порядок сіткової збіжності може бути або досить високим, що вказує на «суперзбіжність», або навіть негативним. У першому випадку індекс сіткової збіжності зазвичай досить малий, але в другому – він є негативним і, ймовірно, великим. У цьому дослідженні чисельний розв'язок, отриманий для потоку в компресорі TFAST, з використанням найбільш дрібної сітки 5-ї групи з 250 млн комірок в міжлопатковому каналі (табл. 3), є прикладом такої поведінки. З іншого боку, чисельний розв'язок може продемонструвати відчутні зміни, коли сітка подрібнена, тоді як індекс сіткової збіжності для деяких параметрів виявляється досить малим. У даному дослідженні прикладами такої розбіжності є чисельне моделювання потоку в ступені ABB-Saturn з використанням сітки 4-ї групи з приблизно 15 млн комірок на кожний міжлопатковий канал (табл. 2) та особливо – турбінній решітці TFAST з плівковим охолодженням (табл. 5). Все це дозволяє зробити висновок, що оцінка індексу сіткової збіжності сама по собі є недостатньою для остаточного аналізу сіткової збіжності. Дослідження величини та знаку порядку збіжності, величини відносної похибки, а також порівняння розв'язків, отриманих із використанням різних сіток, візуально може надати додаткову важливу інформацію щодо сіткової збіжності.

Відносно рекомендацій вибору подрібнення сітки можна зробити такий висновок. Для наукових досліджень, що вимагають високої точності розрахунків і деталізації структури течії, потрібні надзвичайно дрібні сітки, тому в цьому випадку перевагу слід віддавати сіткам 4 та 5-ї груп. Однак, як відомо, такі обчислення вимагають багато часу, і рішення щодо компромісу «час проти роздільної здатності» є допустимим. Тому може бути прийнятним використання проміжних сіток 3-ї групи. Звичайно, згадані вище вимоги щодо розміру комірок біля стінки, кількості комірок в приміжовому шарі і відношення коефіцієнта розширення сітки в напрямку нормалі до стінки в цьому випадку повинні бути строго задоволені. У випадку великих обсягів промислових розрахунків, спрямованих на поліпшення або на порівняння проточних частин турбомашин, може бути достатнім використання проміжних (3-ї групи) або навіть більш грубих сіток. Однак слід пам'ятати, що такі обчислення часто призводять до підвищення ефективності проточних частин лише на 0,001–0,002 (0,1–0,2%), що можна порівняти з помилками дискретизації, або навіть менше за них. Тому кінцеві результати таких обчислень слід завжди перевіряти за допомогою більш дрібних сіток.

Література

1. Hirsch C. Numerical computation of internal and external flows: The fundamentals of computational fluid dynamics. Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2007. 680 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6594-0.X5037-1>.
2. ERCOFTAC: офіційний веб-сайт, 2020. URL: <https://www.ercofac.org>.
3. CFD Online: офіційний веб-сайт, 2020. URL: <https://www.cfd-online.com>.
4. Rautaheimo P., Salminen E., Siikonen T. Numerical simulation of the flow in the NASA low-speed centrifugal compressor. *Intern. J. Turbo and Jet Engines*. 2003. Vol. 20. Iss. 2. P. 155–170. <https://doi.org/10.1515/TJJ.2003.20.2.155>.
5. Diskin B., Thomas J., Rumsey C. L., Schwoeppe A. Grid convergence for turbulent flows (Invited). *Proceeding of the 53rd AIAA Aerospace Sci. Meeting*, Kissimmee, Florida, USA. AIAA. 2015. Paper 2015-1746. 50 p. <https://doi.org/10.2514/6.2015-1746>.
6. Gerolymos G. A., Tsanga G., Vallet I. Near-wall k-ε computation of transonic turbomachinery flows with tip clearance. *AIAA J.* 1998. Vol. 36. No. 10. P. 1769–1777. <https://doi.org/10.2514/2.275>.
7. Duchaine F., Maheu N., Moureau V., Balarac G., Moreau S. Large-eddy simulation and conjugate heat transfer around a low-mach turbine blade. *J. Turbomachinery*. 2014. Vol. 136. Iss. 5. P. 051015-051025. <https://doi.org/10.1115/1.4025165>.
8. Приходько А. А., Полевой О. Б. К расчету пространственных турбулентных отрывных течений. *Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы*. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». 2004. С. 73–87.
9. Su X., Yamamoto S., Yuan X. On the accurate prediction of tip vortex: Effect of numerical schemes. *Proc. ASME Turbo Expo 2013: Turbine Tech. Conf. and Exposition*, San Antonio, TX, USA. ASME. 2013. Paper GT2013-94660. 15 p. <https://doi.org/10.1115/GT2013-94660>.
10. Roache P. J. Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. *J. Fluids Eng.* 1994. Vol. 116. Iss. 3. P. 405–413. <https://doi.org/10.1115/1.2910291>.
11. Roache P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual Review Fluid Mech.* 1997. Vol. 29. P. 123–160. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.123>.

12. Hemez F. M., Tippetts T. B. Successes and failures of verifying the convergence of discrete solutions. *IMAC-XXV: Proc. Conf. & Exposition on Structural Dynamics*, Orlando, Florida, USA, 2007. P. 1686–1698.
13. Ершов С. В., Яковлев В. А. О выборе степени измельчения сетки при расчетах трехмерных течений вязкого газа в турбомашинах. *Вестн. двигателестроения*. 2015. № 2. С. 171–177.
14. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.* 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>.
15. Yershov S., Yakovlev V., Derevyanko A., Gryzun M., Kozyrets D. (2012). The development of new CFD solver for 3D turbomachinery flow computations. *Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery*. Politechnika Łódzka, Łódź, Poland. No. 141. P. 15–24.
16. Ершов С. В. Развитие комплекса программ для расчета трехмерных течений вязкого газа. *Авиац.-косм. техника и технология*. 2012. № 5 (92). С. 89–94.
17. Ершов С. В. Квазимонотонная ENO схема повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера и Навье-Стокса. *Мат. моделирование*. 1994. Т. 6. № 11. С. 63–75.
18. Гризун М. Н., Ершов С. В. Численное моделирование многомерных сжимаемых течений с помощью метода Ньютона. *Вест. НТУ «ХПИ», Сер.: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2013. № 13. С. 38–46.
19. Frink N. T. Assessment of an unstructured-grid method for predicting 3-D turbulent viscous flows. *Proc. AIAA 34th Aerospace Sci. Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA. AIAA. 1996. Paper 96-0292. 12 p. <https://doi.org/10.2514/6.1996-292>.
20. Yershov S., Derevyanko A., Yakovlev V., Gryzun M. Influence of laminar-turbulent transition on 3D flow pattern in subsonic turbine cascade. *Proc. 2016 Propulsion and Energy Forum. 52nd AIAA/SAE/ASME Joint Propulsion Conf.*, Salt-Lake-City, UT, USA, AIAA. 2016. Paper 2016-4552. 17 p. <https://doi.org/10.2514/6.2016-4552>.
21. Yershov S., Yakovlev V. Validation of the PTM transition model on a 3D flow through a turbine cascade. in *IMECE 2016: Proc. ASME 2016 Intern. Mech. Eng. Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, USA, 2016. IMECE 2016-65001. 11 p. <https://doi.org/10.1115/IMECE2016-65001>.
22. Celik I. B., Ghia U., Roache P. J., Freitas C. J., Coleman H., Raad P. E. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *J. Fluids Eng. (Special Publication)*. 2008. Vol. 130. No 7. P. 078001-1–078001-4. <https://doi.org/10.1115/1.2960953>.
23. Denton J. Loss mechanisms in turbomachines. *J. Turbomachinery*. 1993. Vol. 115. Iss. 4. P. 621–656. <https://doi.org/10.1115/1.2929299>.
24. Ubaldi M., Zunino P., Campora U., Ghiglione A. Detailed velocity and turbulence measurements of the profile boundary layer in a large scale turbine cascade. *Proc. Intern. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, Birmingham, UK. ASME. 1996. 96-GT-42. 14 p. <https://doi.org/10.1115/96-GT-042>.
25. Cicatelli G., Sieverding C. H. The effect of vortex shedding on the unsteady pressure distribution around the trailing edge of a turbine blade. *J. Turbomachinery*. 1997. Vol. 119. No. 4. P. 810–819. <https://doi.org/10.1115/1.2841192>.
26. Грановский А. В. Разработка методов повышения газодинамической эффективности высоконагруженных ступеней охлаждаемых газовых турбин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.12 / Моск. энерг. ин-т. М. 2011. 217 с.
27. Transition Location Effect on Shock Wave Boundary Layer Interaction: офіційний веб-сайт, 2020. URL: <http://tfast.eu>.
28. Папазов С. В., Яковлев В. А., Ершов С. В. Численное моделирование течения в компрессорной решетке в широком диапазоне режимов обтекания. *Пробл. машиностроения*. 2014. Т. 17. № 4. С. 3–9.

Надійшла до редакції 23.02.2021

Влияние сеточного разрешения на 3D RANS моделирование течений в проточных частях турбомашин

¹С. В. Ершов, ²В. А. Яковлев

¹ Самозанятый исследователь, Оулу, Финляндия

² Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
61046, Украина, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10

Рассматривается влияние степени измельчения разностной сетки на результаты расчета трехмерных течений вязкого газа в проточных частях турбомашин при использовании моделей течения RANS и численных методов второго порядка. Выполнены расчеты течений для ряда турбинных и компрессорных решеток на по-

следовательно измельчающихся сетках. Использовались сетки типа H с приближенной ортогонализацией ячеек в пограничном слое. Расчеты проводились с помощью CFD решателя F с использованием неявной ENO схемы второго порядка, локального шага по времени и упрощенного многосеточного алгоритма. При расчете течения на мелких сетках применялись: средства ускорения сходимости, реализованные в решателе; усечение расчетной области с последующим распространением результатов на основе свойства симметрии; разбиение расчетной области на части и распараллеливание вычислений. Проведено сопоставление полученных результатов как по качественному разрешению сложной структуры трехмерных потоков, так и по количественной оценке потерь. Сеточная сходимость оценивалась двумя способами. В первом из них визуально сравнивались характерные двумерные распределения параметров, полученные на разных сетках. Целью таких сравнений было оценить достаточную степень решения как общей структуры течения в решетках, так и его особенностей, а именно, скачков уплотнения, контактных разрывов, отрывных зон, следов и пр. Второй способ оценки основывался на индексе сеточной сходимости (GCI). GCI может быть определен не только для интегральных характеристик течения, таких, как потери, силы и т. д., но и для трехмерных полей газодинамических параметров, в частности рассматривался GCI , рассчитанный по трехмерному полю плотности. Сделан вывод, что для научных исследований, требующих высокой точности расчетов и детализации структуры трехмерного течения, нужны очень мелкие разностные сетки, с количеством ячеек от 10^6 до 10^8 в одном межлопаточном канале, в то время как для инженерных расчетов, при выполнении некоторых условий, достаточно сеток с количеством ячеек менее 1 млн в одном межлопаточном канале.

Ключевые слова: решетки турбомашин, CFD, 3D RANS моделирование, вязкое сжимаемое течение, индекс сеточной сходимости, потери кинетической энергии.